# تأثیر طول و رشته‌رشته شدن الیاف پلی‌پروپیلن بر خصوصیات مکانیکی بتن★

«یادداشت پژوهشی»

مهرداد حجازی[۱] سید محسن علوی لنگرودی[۲]

**چکیده** *در این تحقیق تأثیر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن تک‌رشته‌ای نازک با سه طول مختلف و با پنج مقدار متفاوت استفاده از الیاف و به دو صورت غیررشته‌رشته و رشته‌رشته بر روی مقاومت فشاری و خمشی بتن مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌است، تا بهترین طول و مقدار استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن جهت دست یابی به بتنی با خصوصیات مکانیکی (مقاومت فشاری و خمشی) مناسب تعیین گردد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در هر دو حالت استفاده به صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته، استفاده از $1/8\ kg/m^3$ الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۱۲ mm تاثیر قابل توجهی در افزایش مقاومت فشاری داشته است و الیاف پلی‌پروپیلن به طول ۲۴ mm و به مقدار $2/4\ kg/m^3$ مقاومت خمشی بتن را به طرز چشم گیری افزایش داده است. همچنین استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به صورت رشته‌رشته در مقایسه با استفاده به صورت غیر رشته‌رشته باعث افزایش مقاومت فشاری و خمشی بتن شده است.*

**واژه‌های کلیدی** بتن، الیاف پلی‌پروپیلن، طول، غیررشته‌رشته و رشته‌رشته، مقاومت فشاری، مقاومت خمشی.

## Effect of Length and Shredding of Polypropylene Fibres on the Mechanical Properties of Concrete

M. Hejazi M. Alavi

**Abstract** *In this research, the effect of micro monofilament polypropylene fibres with three different lengths and five different amounts of fibre in two cases of non-shred and shred fibres on compressive and flexural strengths of concrete has been investigated and compared. The objective has been to obtain the most favourable length and amount of polypropylene fibres for suitable concrete mechanical properties (compressive and flexural strengths). Obtained results show that for both cases of non-shred and shred fibres, the use of 1.8 $kg/m^3$ of polypropylene fibres with a length of 12 mm has a considerable effect on increasing compressive strength. Use of 2.4 $kg/m^3$ of polypropylene fibres of 24 mm long significantly increases flexural strength. Furthermore use of shred fibres causes the increase of compressive and flexural strengths of concrete compared to non-shred fibres.*

**Key Words** Concrete, Polypropylene Fibres, Length, Shred and Non-Shred, Compressive Strength, Flexural Strength.

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۲/۵/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۴/۱/۲۶ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول: دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

Email: m.hejazi@eng.ui.ac.ir

(۲) کارشناس ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان.

## مقدمه

به‌منظور ایجاد شرایط ایزوتروپی و کاهش ضعف شکنندگی و تردی بتن، استفاده از الیاف نازک و نسبتاً طویل که در تمام حجم بتن به‌صورت همگن و درهم پراکنده گردد متداول شده‌است [1,2]. یکی از انواع الیاف مصنوعی الیاف پلی‌پروپیلن است که اولین بار در سال ۱۹٦۵ به‌عنوان افزودنی بتن برای ساختمان‌های ضد انفجار پیشنهاد شد [3]. الیاف پلی‌پروپیلن با دو هندسهٔ مختلف تک‌رشته‌ای (منفرد) و ریسه‌ای به‌منظور مصرف در بتن ساخته می‌شوند [4].

استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن تک‌رشته‌ای نازک به‌دلیل داشتن مدول الاستیسیتهٔ کم تأثیر چندانی در افزایش مقاومت فشاری بتن ندارد ولی کرنش گسیختگی بالای این الیاف موجب افزایش مقاومت‌های خمشی و کششی بتن می‌گردد [5-8].

## الیاف مصرفی

الیاف مصرفی در این تحقیق از نوع الیاف پلی‌پروپیلن تک‌رشته‌ای نازک تولید شرکت اصفهان سوپلای می‌باشد. مشخصات الیاف پلی‌پروپیلن مذکور در جدول (۱) ارائه شده‌است.

جدول ۱ مشخصات الیاف مصرفی

| خصوصیات الیاف پلی‌پروپیلن | مقدار |
|---|---|
| وزن مخصوص ($g/cm^3$) | ۰/۹۱ |
| قطر (μm) | ۱۸ |
| مدول الاستیک (GPa) | ٦ |
| استحکام کششی (MPa) | ۵۰۰ |
| کرنش نهایی (%) | ۷ |
| ازدیاد طول تا حد پارگی (%) | ۲۰ |
| طول الیاف (mm) | ٦ و ۱۲ و ۲٤ |
| نقطهٔ ذوب (°C) | ۱٦۰ |

در استفادهٔ غیررشته‌رشته، الیاف بدون این که رشته‌رشته شوند در زمان اختلاط بتن به‌همراه دیگر مصالح به‌صورت خشک به ترکیب اضافه می‌گردند. در استفادهٔ رشته‌رشته، الیاف در آب اختلاط قبل از اضافه کردن به مخلوط ریخته می‌شوند و توسط یک کاردک پلاستیکی به‌اندازه‌ای هم زده می‌شوند که الیاف از یکدیگر کاملاً جدا شوند و در انتها فوق روان‌کننده به مخلوط حاصل اضافه می‌گردد.

## دست‌یابی به طرح اختلاط بهینهٔ بتن

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ II ساخت کارخانهٔ سیمان اردستان استفاده شده‌است. چگالی سیمان مذکور برابر ۳/۱۵ $g/cm^3$ می‌باشد. آب مورد استفاده آب لوله‌کشی شهری می‌باشد. برای تأمین کارایی مورد نیاز برای ساخت بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن از فراروان‌کنندهٔ GLENIUM-110 P بر پایهٔ پلی‌کربکسیلات اتر تولید شرکت شیمیایی ساختمان ب. آ. اس. اف ایرانیان استفاده شده‌است. بااستفاده از طرح اختلاط بتن معمولی و درنظر گرفتن توصیه‌ها و تحقیقات انجام‌شده توسط محققان مختلف مرتبط با ساخت بتن الیافی، طرح اختلاط‌های متفاوتی برای بتن با عیار ٤۰۰ $kg/m^3$ و نسبت W/C = ۰/٤۵ مورد بررسی قرار گرفت. سپس بهترین طرح اختلاط که هم از نظر کارایی و هم از جهت مقاومت مناسب بود به‌عنوان طرح اختلاط نهایی انتخاب گردید (جدول ۲).

جدول ۲ طرح اختلاط نهایی برای ۱ $m^3$ بتن

| | |
|---|---|
| نسبت آب به سیمان (W/C) | ۰/٤۳ |
| آب ($kg/m^3$) | ۱۷۲ |
| سیمان تیپ ۲ اردستان ($kg/m^3$) | ٤۰۰ |
| شن با اندازهٔ mm (۵–۹/۵) ($kg/m^3$) | ٦۷۵ |
| ماسه با اندازهٔ mm (۰–۲) ($kg/m^3$) | ٦٦۵ |
| ماسه با اندازهٔ mm (۲–۵) ($kg/m^3$) | ٤٤۵ |
| الیاف پلی‌پروپیلن ($kg/m^3$) | ۰ |
| فوق روان‌کننده ($kg/m^3$) | ٤/۲ |

## تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی

در این تحقیق برای بررسی مقاومت فشاری و خمشی بتن از ۳۱ نوع طرح اختلاط استفاده شده‌است. قابل ذکر است که در این طرح اختلاط‌ها جز طرح اختلاط مربوط به نمونهٔ فاقد الیاف (شاهد)، که در جدول (۲) ارائه گردید، سه پارامتر طول (٦، ۱۲ و ۲٤ mm)، نحوهٔ استفاده (به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته) و مقادیر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن (۰/٦، ۱/۲، ۱/۸، ۲/٤ و ۳ kg/m³) تغییر می‌کنند. جدول (۳) طرح‌های اختلاط را براساس ۳ پارامتر طول، نحوهٔ استفاده و مقادیر استفاده‌شدهٔ الیاف پلی‌پروپیلن نشان می‌دهد.

جدول ۳ طرح‌های اختلاط براساس طول، نحوهٔ استفاده و مقادیر الیاف

| طول الیاف (mm) | نحوهٔ استفاده | میزان استفاده ($kg/m^3$) |
|---|---|---|
| ٦ | رشته‌رشته و غیر رشته‌رشته | ۰/٦ |
| | | ۱/۲ |
| | | ۱/۸ |
| | | ۲/٤ |
| | | ۳ |
| ۱۲ | رشته‌رشته و غیر رشته‌رشته | ۰/٦ |
| | | ۱/۲ |
| | | ۱/۸ |
| | | ۲/٤ |
| | | ۳ |
| ۲٤ | رشته‌رشته و غیر رشته‌رشته | ۰/٦ |
| | | ۱/۲ |
| | | ۱/۸ |
| | | ۲/٤ |
| | | ۳ |

## عمل‌آوری نمونه‌ها

قالب‌ها پس از گذشت ۲٤ ساعت باز می‌شوند و نمونه‌های بتنی برای انجام گیرش و عمل‌آوری در حوضچهٔ آب تا زمان انجام آزمایش مربوطهٔ نگهداری می‌شوند. دمای حوضچهٔ آب همواره ثابت نگه داشته می‌شود. در زمان انجام آزمایش، نمونه‌ها از حوضچهٔ آب خارج می‌شوند و مدت کوتاهی در محیط عادی آزمایشگاه قرار داده می‌شوند تا سطح نمونه‌ها خشک شود، آن‌گاه آزمایش مربوط بر روی آنها صورت می‌گیرد.

## استانداردهای مورد استفاده برای انجام آزمایش‌های مربوط

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری از استاندارد BS 1881-108 [9] استفاده شده‌است. به‌طوری‌که برای هر طرح اختلاط دو نمونهٔ مکعبی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰cm³ ساخته شده و میانگین آن در نتایج لحاظ گردیده است. برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی بتن (مقاومت کششی بتن تحت کشش ناشی از خمش یا مدول گسیختگی)، از استاندارد ASTM-C78 [10] استفاده شده‌است. به‌طوری‌که برای هر طرح اختلاط دو نمونه تیر منشوری به ابعاد ۱۰×۱۰×۵۰ cm³ ساخته شده و میانگین آن در نتایج لحاظ گردیده‌است.

## نتایج حاصل از مقاومت فشاری

نتایج به‌دست آمده برای مقاومت فشاری در جدول (٤) و اشکال (۱) تا (۱۲) نشان داده شده‌است.

با بررسی جدول (٤) و شکل (۱) می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ٦۰ روز بتن حاوی ۰/٦ kg/m³ و ۱/۲ kg/m³ الیاف پلی‌پروپیلن به طول ٦ mm و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته از نمونهٔ شاهد کمتر است، به‌طوری‌که گرچه با افزودن الیاف به مقدار ۱/۸ kg/m³ مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ٦۰ روز بتن به‌ترتیب ٤/٤٤٪، ۱/٦٤٪ و ۱/۳۳٪ نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش یافته‌است، لیکن با افزودن الیاف به‌میزان بیشتر از این مقدار (یعنی ۲/٤ kg/m³ و ۳ kg/m³) روند تغییرات مقاومت فشاری کاهشی می‌باشد.

جدول ٤ مقاومت فشاری در سنین مختلف نمونه ها

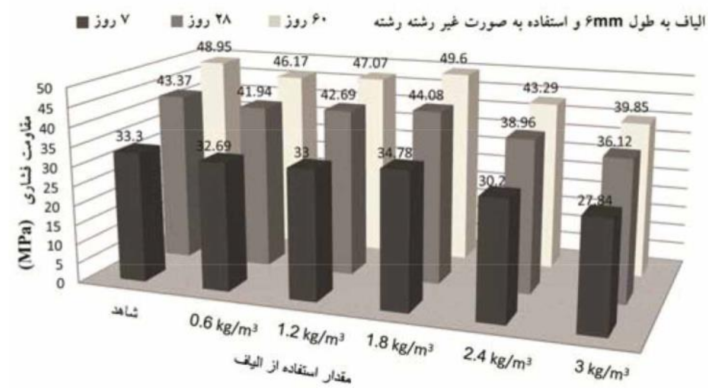
| مقدار الیاف (kg/m3) | مقاومت فشاری (MPa) | | |
|---|---|---|---|
| | ۷ روز | ۲۸ روز | ٦۰ روز |
| | الیاف به‌طول ٦ mm و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته | | |
| ۰/٦ | ۳۲/٦۹ | ٤۱/۹٤ | ٤٦/۱۷ |
| ۱/۲ | ۳۳/۰۰ | ٤۲/٦۹ | ٤۷/۰۷ |
| ۱/۸ | ۳٤/۷۸ | ٤٤/۰۸ | ٤۹/٦ |
| ۲/٤ | ۳۰/۲ | ۳۸/۹٦ | ٤۳/۲۹ |
| ۳ | ۲۷/۸٤ | ۳٦/۱۲ | ۳۹/۸۵ |
| | الیاف به‌طول ٦ mm و استفاده به‌صورت رشته‌رشته | | |
| ۰/٦ | ۳۳/٤۸ | ٤۳/۱٤ | ٤۷/۲۸ |
| ۱/۲ | ۳٤/۱۲ | ٤٤/۵۸ | ٤۹/۰۰ |
| ۱/۸ | ۳٦/۵۱ | ٤۵/۹۸ | ۵۱/۰۵ |
| ۲/٤ | ۳۲/۹۲ | ٤۲/۵٦ | ٤٦/۸٤ |
| ۳ | ۳۱/۱۹ | ٤۰/۵ | ٤٤/۱٤ |
| | الیاف به‌طول ۱۲ mm و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته | | |
| ۰/٦ | ۳٤/۳۸ | ٤۳/٦٦ | ٤۹/۱ |
| ۱/۲ | ۳۵/۷۷ | ٤۵/۲۲ | ۵۰/۹۷ |
| ۱/۸ | ۳۷/۰۹ | ٤۷/۰۵ | ۵۲/۷۸ |
| ۲/٤ | ۳۳/۸٤ | ٤۳/٦۳ | ٤۸/۵ |
| ۳ | ۳۱/۰٦ | ۳۹/٦۲ | ٤٤/۰۰ |
| | الیاف به‌طول ۱۲ mm و استفاده به‌صورت رشته‌رشته | | |
| ۰/٦ | ۳٤/۷۹ | ٤٤/۲۵ | ٤۹/۰۲ |
| ۱/۲ | ۳٦/۷٤ | ٤٦/٦۸ | ۵۲/۱۷ |
| ۱/۸ | ۳۸/٤۵ | ٤۸/۸۵ | ۵٤/٦ |
| ۲/٤ | ۳۵/۸۱ | ٤٦/۳۵ | ۵۰/۹۱ |
| ۳ | ۳۳/۷ | ٤۳/٤٦ | ٤۸/۱٦ |
| | الیاف به‌طول ۲٤ mm و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته | | |
| ۰/٦ | ۳۲/۵٦ | ٤۱/۰۲ | ٤٦/۹۸ |
| ۱/۲ | ۳۰/۷ | ۳۸/٦۸ | ٤٤/۲۱ |
| ۱/۸ | ۲۸/٦۲ | ۳۵/۸۷ | ٤۰/۳۵ |
| ۲/٤ | ۲۵/۹۵ | ۳۳/۲۷ | ۳۷/٦۳ |
| ۳ | ۲۲/۳٤ | ۲۹/۰۰ | ۳۲/۲۵ |
| | الیاف به‌طول ۱۲ mm و استفاده به‌صورت رشته‌رشته | | |
| ۰/٦ | ۳۲/۸۵ | ٤۱/۸۷ | ٤٦/۵ |
| ۱/۲ | ۳۱/٤۲ | ۳۹/۹ | ٤۵/٤ |
| ۱/۸ | ۲۹/۷۳ | ۳۸/۱۵ | ٤۲/۲۲ |
| ۲/٤ | ۲۷/٤ | ۳۵/۰۷ | ۳۹/٦۱ |
| ۳ | ۲٤/۳٦ | ۳۱/٤٦ | ۳۵/۵۵ |

شکل (۲) حاکی از آن است که روند تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm و استفاده به‌صورت رشته‌رشته با افزودن الیاف از ۰/٦ $kg/m^3$ به ۱/۸ $kg/m^3$ به‌صورت افزایشی می‌باشد. البته قابل ذکر است که نمونه‌های حاوی ۰/٦ $kg/m^3$ الیاف در سنین ۲۸ و ٦۰ روز مقاومت فشاری به‌ترتیب ۰/۵۳٪ و ۳/٤۱٪ کمتر از نمونهٔ شاهد کسب نموده‌اند، به‌طوری‌که استفاده از الیاف به‌مقدار ۱/۸ $kg/m^3$ بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد نشان می‌دهد (حدود ۹/٦٤٪، ٦/۰۲٪ و ٤/۲۹٪ به‌ترتیب در نمونه‌های ۷، ۲۸ و ٦۰ روز)، حال آن‌که با افزودن الیاف به‌میزان بیشتر از این مقدار (یعنی ۲/٤ $kg/m^3$ و ۳ $kg/m^3$) روند تغییرات مقاومت فشاری کاهشی می‌باشد. هم‌چنین با افزایش سن عمل‌آوری نمونه‌ها از ۷ به ٦۰ روز، روند تأثیر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm و استفاده به‌صورت رشته‌رشته نیز مشابه تأثیر استفاده از این الیاف به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت فشاری بتن و به‌صورت کاهشی می‌باشد.

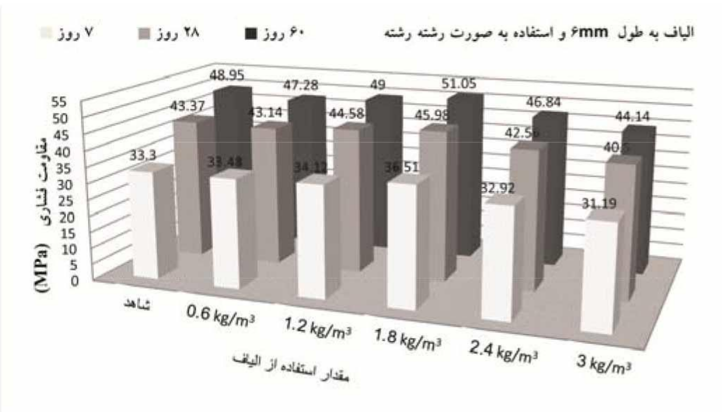
با بررسی شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۱۲ mm و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته با افزودن الیاف از ۰/٦ $kg/m^3$ به ۱/۸ $kg/m^3$ به‌صورت افزایشی می‌باشد. به‌طوری‌که استفاده از الیاف به مقدار ۱/۸ $kg/m^3$ بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد نشان می‌دهد (حدود ۱۱/۳۸٪، ۸/٤۸٪ و ۷/۸۲٪ به‌ترتیب در نمونه‌های ۷، ۲۸ و ٦۰ روز). حال آن‌که با افزودن الیاف به‌میزان بیشتر از این مقدار (یعنی ۲/٤ $kg/m^3$ و ۳ $kg/m^3$) روند تغییرات مقاومت فشاری کاهشی می‌باشد.

بررسی شکل (٤) نشان می‌دهد که روند تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۱۲ mm و استفاده به‌صورت رشته‌رشته با افزودن الیاف از ۰/٦ $kg/m^3$ به ۱/۸ $kg/m^3$ به‌صورت افزایشی می‌باشد. به‌طوری‌که استفاده از الیاف به‌مقدار

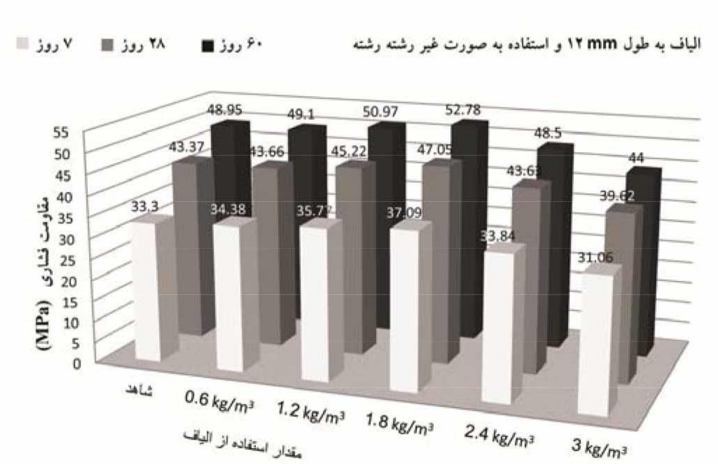
۱/۸ $kg/m^3$ بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ شاهد نشان می‌دهد (حدود ۱۵/۴۶٪، ۱۲/۶۳٪ و ۱۱/۵۴٪ به‌ترتیب در نمونه‌های ۷، ۲۸ و ۶۰ روز). حال آن‌که با افزودن الیاف به‌میزان بیشتر از این مقدار (یعنی ۲/۴ و ۳ $kg/m^3$) روند تغییرات مقاومت فشاری کاهشی می‌باشد.



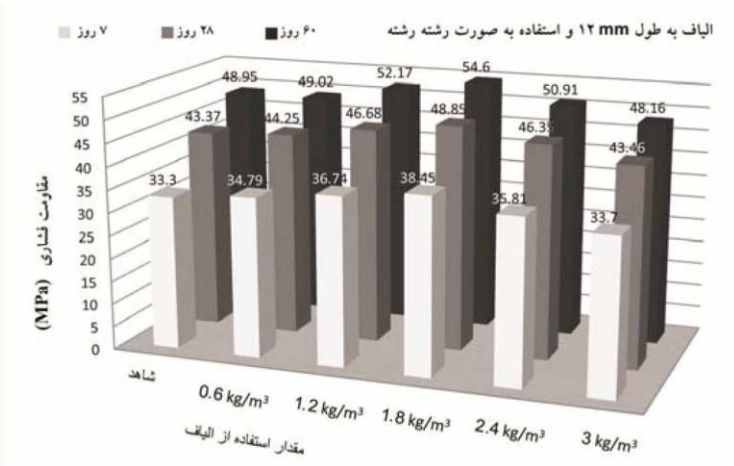

شکل ۱ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف به‌طول ٦ mm و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته در سنین مختلف



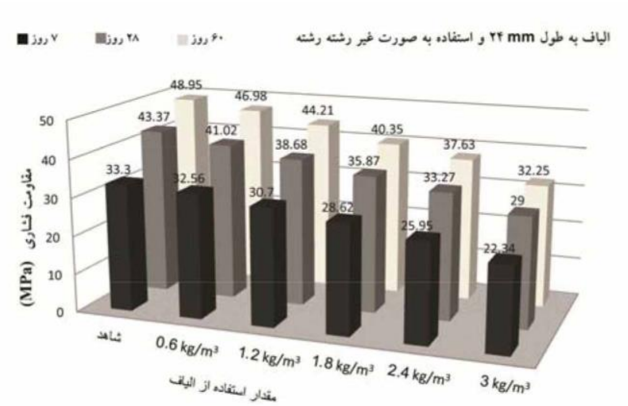

شکل ۲ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف به‌طول ٦ mm و استفاده به‌صورت رشته‌رشته در سنین مختلف



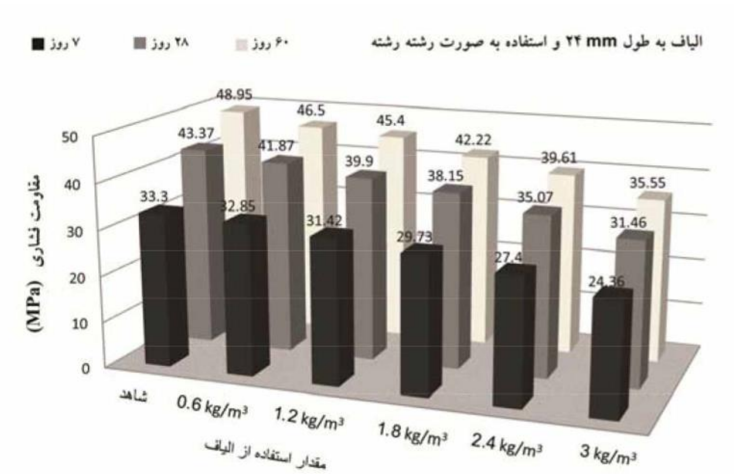

شکل ۳ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف به‌طول ۱۲ mm و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته در سنین مختلف




شکل ٤ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف به‌طول mm ۱۲ و استفاده به‌صورت رشته‌رشته در سنین مختلف




شکل ٥ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف به‌طول mm ۲٤ و استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته در سنین مختلف




شکل ٦ نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف به‌طول mm ۲٤ و استفاده به‌صورت رشته‌رشته در سنین مختلف

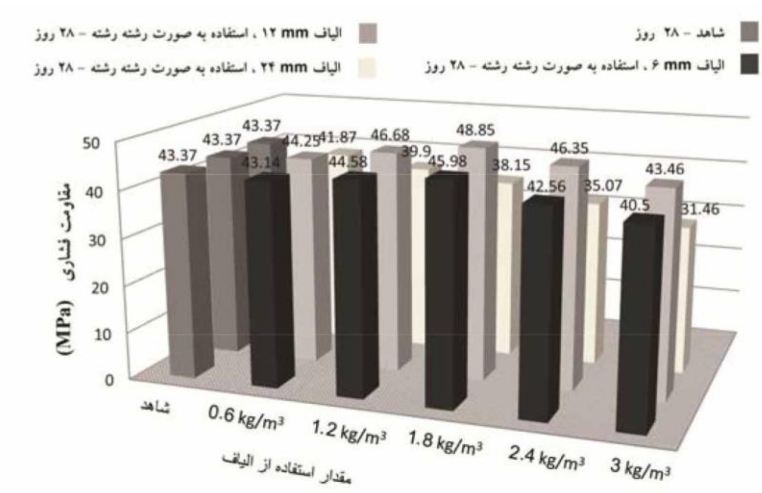
با مقایسهٔ اشکال (٥) و (٦) می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات مقاومت فشاری بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول mm ۲٤ در هر دو حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته با افزودن الیاف از

۰/٦ kg/m³ به ۳ kg/m³ بـه‌صورت کاهشی می‌باشد. هم‌چنین قابل ذکر است که تمامی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف استفاده از این الیاف در سنین ۷، ۲۸ و ٦۰ روز، مقاومت فشاری کمتر از مقاومت فشاری نمونهٔ شاهد کسب نموده‌اند.

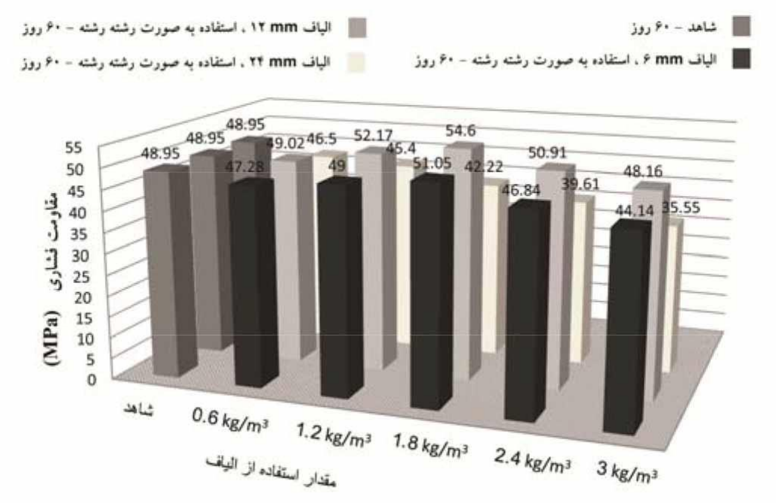
اشکال (۷) تا (۹) اثر طول‌های مختلف الیاف پلی-پروپیلن را در حالت استفاده به‌صورت رشته‌رشته و با مقادیر مختلف استفاده از الیاف بر روی مقاومت فشاری بتن در سنین مختلف عمل‌آوری نشان می‌دهند. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۱۲ mm بیشترین اثر در افزایش مقاومت فشاری را نسبت به استفاده از سایر الیاف به‌طول‌های ٦ mm و ۲٤ mm دارد. به‌طور مثال درصورت استفاده از ۳ kg/m³ الیاف پلی‌پروپیلن به‌صورت رشته‌رشته مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ٦۰ روز به‌ترتیب ۳۱/۱۹ MPa، ۳۳/۷ MPa و ۲٤/۳٦ MPa برای طول ٦ mm، ٤۰/۵ MPa، ٤۳/٤٦ MPa و ۳۱/٤٦ MPa برای طول ۱۲ mm، و ٤٤/۱٤ MPa، ٤۸/۱٦ MPa و ۳۵/۵۵ MPa برای طول ۲٤ mm می‌باشد.




شکل ۷ اثر استفاده از الیاف به‌طول‌های ٦ mm، ۱۲ mm و ۲٤ mm به‌صورت رشته‌رشته بر مقاومت فشاری بتن در سن ۷ روز




شکل ۸ اثر استفاده از الیاف به‌طول‌های ٦ mm، ۱۲ mm و ۲٤ mm به‌صورت رشته‌رشته بر مقاومت فشاری بتن در سن ۲۸ روز




شکل ۹ اثر استفاده از الیاف به‌طول‌های ٦ mm، ١٢ mm و ٢٤ mm و به‌صورت رشته‌رشته بر مقاومت فشاری بتن در سن ٦٠ روز

## نتایج حاصل از مقاومت خمشی

نتایج به‌دست‌آمده برای مقاومت خمشی در جدول (۵) و اشکال (۱۹) تا (۳۲) نشان داده شده‌است.

با بررسی جدول (۵) و مقایسهٔ اشکال (۱۰) تا (١٤) می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm در هر دو حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته با افزودن الیاف از ٠/٦ kg/m³ به ٢/٤ kg/m³ به‌صورت افزایشی می‌باشد. به‌طوری‌که استفاده از این الیاف به مقدار ٢/٤ kg/m³ بیشترین تأثیر را در افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونهٔ فاقد الیاف (شاهد) داشته‌است (حدود ٨/٦٩٪ و ١٢/٣٧٪ به‌ترتیب در حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته). حال آن‌که با افزودن الیاف به‌میزان بیشتر از این مقدار (یعنی ٣ kg/m³) مقاومت خمشی به‌شدت کاهش یافته‌است. ولی با این‌حال هنوز مقاومت خمشی حاصل، در حالت استفاده به‌صورت رشته‌رشته از مقاومت خمشی نمونهٔ شاهد بیشتر است.

با بررسی شکل (۱۱) می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ١٢ mm در هر دو حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته باافزودن الیاف از ٠/٦ kg/m³ به ٢/٤ kg/m³ به‌صورت افزایشی می‌باشد. به‌طوری‌که استفاده از این الیاف به‌مقدار ٢/٤ kg/m³ بیشترین تأثیر در افزایش مقاومت خمشی را نسبت به نمونهٔ فاقد الیاف (شاهد) داشته است (حدود ١٥/٢٢٪ و ١٨/٩٪ به‌ترتیب در حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته). حال آن‌که باافزودن الیاف به‌میزان بیشتر از این مقدار (یعنی ٣ kg/m³) مقاومت خمشی به‌شدت کاهش یافته‌است ولی با این‌حال هنوز مقاومت خمشی حاصل، از مقاومت خمشی نمونهٔ شاهد بیشتر است.

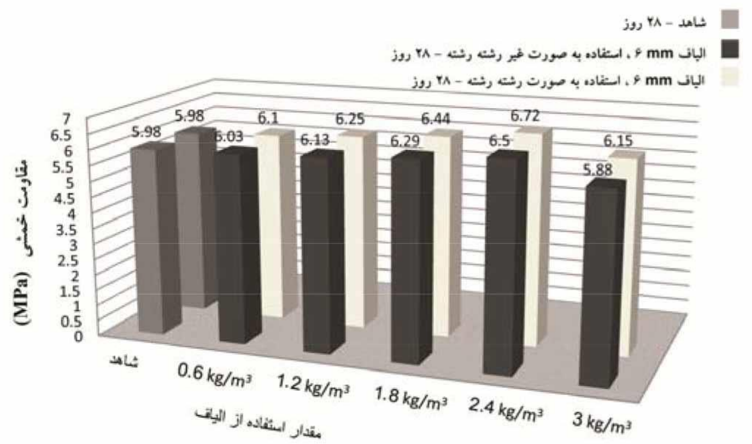
با بررسی شکل (١٢) می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٢٤ mm در هر دو حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته با افزودن الیاف از ٠/٦ kg/m³ به ٢/٤ kg/m³ به‌صورت افزایشی می‌باشد. به‌طوری‌که استفاده از این الیاف به‌مقدار ٢/٤ kg/m³ بیشترین تأثیر در افزایش مقاومت خمشی را نسبت به نمونهٔ فاقد الیاف (شاهد) داشته‌است (حدود ١٧/٥٦٪ و ٢٠/٤٥٪ به‌ترتیب در حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته). حال آن‌که با افزودن الیاف به‌میزان بیشتر از این مقدار (یعنی ٣ kg/m³) مقاومت خمشی به‌شدت کاهش یافته‌است ولی با این‌حال هنوز

مقاومت خمشی حاصل، از مقاومت خمشی نمونهٔ شاهد بیشتر است.

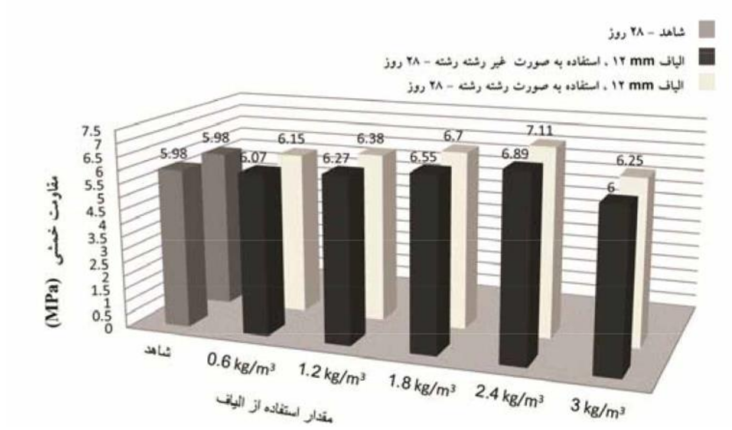
اشکال (۱۳) و (۱٤) نشان می‌دهند که مقاومت خمشی بتن حاوی الیاف پلی‌پروپیلن در استفاده هم به‌صورت غیر رشته‌رشته و هم به‌صورت رشته‌رشته باافزایش طول الیاف، افزایش می‌یابد. به‌طور کلی می‌توان گفت که استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۲٤ mm و به‌صورت رشته‌رشته بیشترین اثر را در افزایش مقاومت خمشی نسبت به سایر الیاف پلی پروپیلن مورد استفاده به‌طول‌های ٦ mm و ۱۲ mm داشته‌است. به‌طور مثال درصورت استفاده از ۳ kg/m$^3$ الیاف پلی‌پروپیلن به‌صورت رشته‌رشته و با طول‌های ٦ mm، ۱۲ mm و ۲٤ mm مقاومت خمشی ۲۸ روز بتن به‌ترتیب ٦/۱٥ MPa، ٦/۲٥ MPa و ٦/٤۷ MPa می-باشد. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۲٤ mm و به‌صورت رشته‌رشته نه‌تنها باعث افزایش مقاومت خمشی درمقایسه با سایر الیاف پلی‌پروپیلن مورد استفاده به‌طول ٦ mm و ۱۲ mm شده‌است، بلکه سبب گردیده‌است که تمامی نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف این الیاف مقاومت خمشی به‌مراتب بیشتر از مقاومت خمشی نمونهٔ شاهد کسب نمایند.

جدول ٥ مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز نمونه‌ها

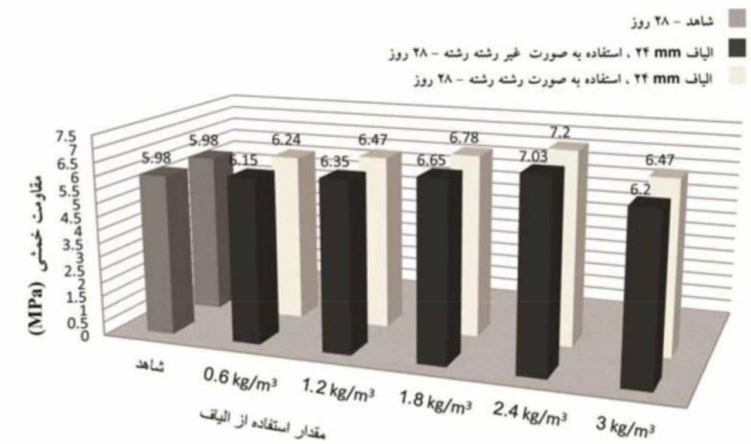
| مقدار الیاف (kg/m$^3$) | مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز (MPa) | |
|---|---|---|
| | الیاف به‌طول ٦ mm | |
| | غیر رشته‌رشته | رشته‌رشته |
| ۰/٦ | ٦/۰۳ | ٦/۱ |
| ۱/۲ | ٦/۱۳ | ٦/۲٥ |
| ۱/۸ | ٦/۲۹ | ٦/٤٤ |
| ۲/٤ | ٦/٥ | ٦/۷۲ |
| ۳ | ٥/۸۸ | ٦/۱٥ |
| | الیاف به‌طول ۱۲ mm | |
| | غیر رشته‌رشته | غیر رشته‌رشته |
| ۰/٦ | ٦/۰۷ | ٦/۱٥ |
| ۱/۲ | ٦/۲۷ | ٦/۳۸ |
| ۱/۸ | ٦/٥٥ | ٦/۷ |
| ۲/٤ | ٦/۸۹ | ۷/۱۱ |
| ۳ | ٦/۰۰ | ٦/۲٥ |
| | الیاف به‌طول ۲٤ mm | |
| | غیر رشته‌رشته | غیر رشته‌رشته |
| ۰/٦ | ٦/۱٥ | ٦/۲٤ |
| ۱/۲ | ٦/۳٥ | ٦/٤۷ |
| ۱/۸ | ٦/٦٥ | ٦/۷۸ |
| ۲/٤ | ۷/۰۳ | ۷/۲ |
| ۳ | ٦/۲ | ٦/٤۷ |



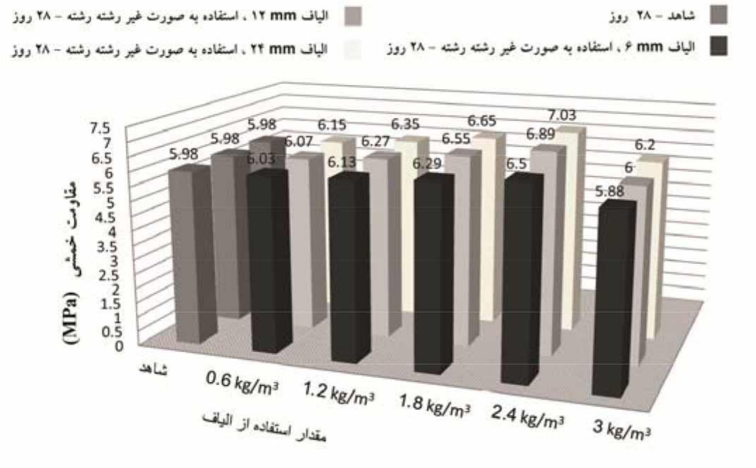

شکل ۱۰ اثر استفاده از الیاف به‌طول ٦ mm و به‌صورت رشته‌رشته در مقایسه با استفاده نمودن آن به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت خمشی بتن در سن ۲۸ روز



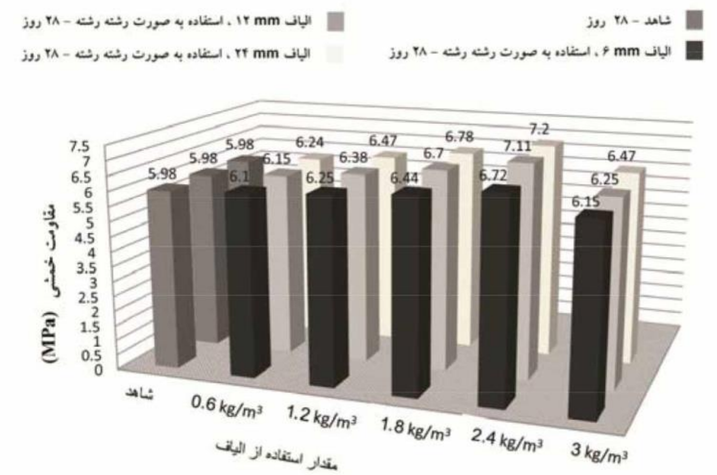

شکل ۱۱ اثر استفاده از الیاف به‌طول ۱۲ mm و به‌صورت رشته‌رشته درمقایسه با استفاده نمودن آن به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت خمشی بتن در سن ۲۸ روز




شکل ۱۲ اثر استفاده از الیاف به‌طول ۲٤ mm و به‌صورت رشته‌رشته درمقایسه با استفاده نمودن آن به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت خمشی بتن در سن ۲۸ روز




شکل ۱۳ اثر استفاده از الیاف به‌طول‌های ٦ mm، ۱۲ mm و ۲٤ mm به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت خمشی بتن در سن ۲۸ روز




شکل ١٤ اثر استفاده از الیاف به‌طول‌های ٦ mm، ١٢ mm و ٢٤ mm به‌صورت رشته‌رشته بر مقاومت خمشی بتن در سن ٢٨ روز

## بررسی رابطهٔ مقاومت خمشی با مقاومت فشاری بتن

آیین‌نامهٔ ACI-318 [11] رابطهٔ تجربی (١) را برای تعیین مقاومت خمشی بتن (مدول گسیختگی) براساس مقاومت فشاری بتن، پیشنهاد نموده‌است. در این بخش به بررسی و مقایسهٔ رابطهٔ مذکور برای نمونه‌های بتنی فاقد الیاف و مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن تک‌رشته‌ای نازک در سن ٢٨ روز پرداخته شده‌است تا مشخص گردد که آیا از رابطهٔ مذکور می‌توان در مورد بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن نیز استفاده نمود؟

$$f_r = 0.7\sqrt{f'_c} \qquad (١)$$

در رابطهٔ (١) $f_r$ و $f'_c$ به‌ترتیب مدول گسیختگی و مقاومت فشاری بتن در سن ٢٨ روز و برحسب MPa می‌باشند.

نتایج نشان می‌دهد که استفاده از رابطهٔ مذکور منجر به ارائهٔ مقادیر مقاومت خمشی می‌گردد که همواره کوچک‌تر از مقادیر آزمایشگاهی است و درجهت اطمینان می‌باشد. اختلاف مربوط به نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm و به‌صورت رشته‌رشته و غیر رشته‌رشته به‌ترتیب ٤٧/٠٤٪ و ٤٨/٧٤٪ می‌باشد. این اختلاف برای الیاف به‌طول ١٢ mm به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته به‌ترتیب ٤٩/١٣٪ و ٤٩/٣٧٪ و برای الیاف به‌طول ٢٤ mm به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته به ترتیب ٧٤٪ و ٧٣/٩١٪ می‌باشد. یکی از دلایل این اختلاف این است که الیاف باعث کاهش تردی و شکنندگی بتن و منجر به افزایش مقاومت خمشی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی می‌گردد.

## نتیجه‌گیری

١. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته اثر چندانی بر افزایش مقاومت فشاری بتن ندارد. هم‌چنین روند اثر استفاده از الیاف پلی پروپیلن به‌طول ٦ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت فشاری، با افزایش سن عمل‌آوری از ٧ به ٦٠ روز، کاهش یافته‌است.

٢. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ١٢ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته از ٠/٦ $kg/m^3$ به ١/٨$kg/m^3$ با افزایش مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ فاقد الیاف (شاهد) همراه بوده‌است. هم‌چنین روند اثر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ١٢ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت فشاری، با افزایش سن عمل‌آوری از ٧ به ٦٠ روز، کاهش

یافته‌است (مشابه استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته).

۳. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۲٤ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته از ۰/٦ $kg/m^3$ به ۳ $kg/m^3$ با کاهش چشم‌گیر مقاومت فشاری نسبت به نمونهٔ فاقد الیاف (شاهد) همراه بوده‌است. هم‌چنین روند اثر استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۲٤ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته بر مقاومت فشاری، با افزایش سن عمل‌آوری از ۷ به ٦۰ روز، روند منظمی را نشان نمی‌دهد.

٤. مقاومت فشاری بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۱۲ mm از مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول‌های ٦ mm و ۲٤ mm بیشتر است (در هر دو حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته). لیکن با افزودن این الیاف به‌مقدار بیشتر از ۲/٤ $kg/m^3$ مقاومت فشاری حاصل، از مقاومت فشاری نمونهٔ شاهد کمتر شده‌است. کمترین مقدار مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۲٤ mm است.

۵. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌صورت رشته‌رشته درمقایسه با استفاده نمودن از آن به‌صورت غیر رشته‌رشته، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن می‌گردد. البته در بیشتر نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm و ۲٤ mm مقاومت فشاری حاصل، هنوز از مقاومت فشاری نمونهٔ شاهد کمتر است.

٦. افزودن الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ٦ mm، ۱۲ mm و ۲٤ mm و به‌صورت غیر رشته‌رشته از ۰/٦ $kg/m^3$ به ۲/٤ $kg/m^3$ باعث افزایش قابل توجه مقاومت خمشی نسبت به نمونهٔ فاقد الیاف (شاهد) شده‌است. به‌طوری‌که مقاومت خمشی ۲۸ روز برای ۲/٤ $kg/m^3$ الیاف به‌ترتیب ۸/٦۹٪، ۱۵/۲۲٪ و ۱۷/۵٦٪ نسبت به نمونهٔ شاهد افزایش یافته‌است. با افزودن الیاف به مقدار ۳ $kg/m^3$ مقاومت خمشی به‌شدت کاهش یافته‌است ولی با این‌حال هنوز مقاومت خمشی حاصل (در صورت استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۱۲ mm و ۲٤ mm)، از مقاومت خمشی نمونهٔ شاهد بیشتر است.

۷. مقاومت خمشی بتن مسلح به الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول ۲٤ mm از مقاومت خمشی نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به‌طول‌های ٦ mm و ۱۲ mm بیشتر است (در هر دو حالت استفاده به‌صورت غیر رشته‌رشته و رشته‌رشته).

۸. استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن به‌صورت رشته‌رشته درمقایسه با استفاده نمودن از آن به‌صورت غیر رشته‌رشته، باعث افزایش مقاومت خمشی بتن می‌گردد و اثر رشته‌رشته نمودن الیاف بر مقاومت خمشی با افزایش مقدار الیاف، افزایش می‌یابد.

۹. استفاده از رابطهٔ تجربی پیشنهادی توسط آیین‌نامهٔ ACI-318 منجر به مقاومت‌های خمشی می‌گردد که همواره کوچک‌تر از مقادیر آزمایشگاهی است و در جهت اطمینان است.

## مراجع

1. Payrow, P., "Fiber Reinforced Concrete, Surface Treatment of Polymeric Fibers", VDM Verlag Dr. Müller, (2009).
2. Di Prisco, M., Plizzari, G. and Vandewalle, L., "Fibre Reinforced Concrete: New Design Perspectives", *Materials and Structures*, Vol. 42, No. 9, pp. 1261-1281, (2009).
3. Yu, R., Speisz, P. and Brouwers, H.J.H., "Mix Design and Properties Assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)", *Cement and Concrete Research*, Vol. 56, pp.

29-39, (2014).

4. Kakooei, S., Akil, H., Jamshidi, M. and Rouhi, J., "The Effects of Polypropylene Fibers on the Properties of Reinforced Concrete Structures", *Construction and Building Materias*, Vol. 27, No. 1, pp. 73-77, (2012).
5. Wong, C.M., "Use of Short Fibres in Structural Concrete to Enhance Mechanical Properties", BSc Dissertation, Faculty of Engineering and Surveying, University of Southern Queensland, (2004).
6. Bagherzadeh, R., Sadeghi, A.H. and Latifi, M., "Utilizing Polypropylene Fibers to Improve Physical and Mechanical Properties of Concrete", *Textile Research Journal*, 0040517511420767, (2011).
7. Mukhopadhyay, S. and Khatana, S., "A Review on the Use of Fibers in Reinforced Cementitious Concrete", *Journal of Industrial Textiles*, 1528083714529806, (2014).
8. Shan, L. and Zhang, L., "Experimental Study on Mechanical Properties of Steel and Polypropylene Fiber-reinforced Concrete", *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 584, pp. 1355-1361, (2014).
9. BS 1881-108, "Testing Concrete. Method for Making Test Cubes from Fresh Concrete", British Standards Institution, London, (1983).
10. ASTM C78-02, "Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)", American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, (2002).
11. ACI 318-08, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, (2008).